SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Marković

Zagreb, 2018

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Doc. dr. sc. Gorana Baršić, dipl. ing. Ivan Marković

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Prvenstveno želim zahvaliti mentorici, doc. dr. sc. Gorani Baršić na uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog rada, te na potpori za njegovo ostvarenje, te prof. dr. sc. Damiru Markučiču na savjetima.

Posebno bih htio zahvaliti obitelji koji su mi pružali moralnu pomoć te se radovali svakom mom uspjehu.

Ivan Marković

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN MARKOVIĆ** Mat. br.: 0035196414

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Umjeravanje radnih etalona UT sustava**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Calibration of UT calibration blocks**

Opis zadatka:

Ultrazvučno ispitivanje uključuje funkcionalno zavisne elemente - ultrazvučni uređaj, ultrazvučne sonde i radne etalone. O odabiru elemenata i njihovih značajki ovise radne karakteristike ultrazvučnog sustava. U primjeni su česti radni etaloni br. 1 i br. 2 čije su dimenzionalne značajke propisane normama EN ISO 2400:2012 i EN ISO 7963:2010. Kako bi se osigurale pouzdane vrijednosti kritičnih dimenzija na radnim etalonima, potrebno je razraditi i primijeniti postupak njihovog umjeravanja. U skladu s navedenim u diplomskom radu potrebno je obraditi sljedeće:

1. Detaljno opisati dimenzionalne značajke radnih etalona br. 1 i br. 2 prema zahtjevima normi EN ISO 2400:2012 i EN ISO 7963:2010.
2. Definirati kritične dimenzije koje je potrebno izmjeriti na radnim etalonima br. 1 i br. 2.
3. Primijeniti prikladne mjerne metode za utvrđivanje kritičnih dimenzija, uvažavajući normama propisane tolerancije i mjerne mogućnosti Laboratorija za precizna mjerenja dužina.
4. Komentirati ostvarene rezultate i dati preporuke za eventualna poboljšanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
27. rujna 2018.

Rok predaje rada:
29. studenog 2018.

Predviđeni datum obrane:
05. prosinca 2018.
06. prosinca 2018.
07. prosinca 2018.

Zadatak zadao:
doc. dr. sc. Gorana Baršić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD 1

2. ETALONI ZA ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE 2

3. KARAKTERISTIKE ETALONA BR. 1, BR. 2 I STEPENIČASTOG PREMA RELEVANTNIM NORMAMA 8

3.1. ISO 2400:2012: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za radni etalon br. 1 8

3.2. ISO 7963:2010: Nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za radni etalon br. 2 10

3.3. ISO/DIS 16946:2012: Nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za Stepeničasti etalon 12

4. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA ETALONA BR.1 13

5. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA ETALONA BR.2 22

6. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA STEPENASTOG ETALONA 27

7. MJERNA NESIGURNOST 38

7.1. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na CMM-u (trokordinatni mjerni uređaj) 40

7.2. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na 2D optičkom mjernom uređaju 40

7.3. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na mikrometru 41

7.4. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na uređaju za ispitivanje hrapavosti 41

7.5. Procjena mjerne nesigurnosti mjerene veličine ostvarene na jednoosnom mjernom uređaju 41

8. ZAKLJUČAK 45

LITERATURA 47

PRILOG 1 48

PRILOG 2 55

POPIS SLIKA

Slika 1. Nastajanje longitudinalnog vala 2
Slika 2. Nastajanje transverzalnog vala 2
Slika 4. Dimenzije etalona br. 1 9
Slika 5. Dimenzije etalona br.2 10
Slika 6. Dimenzije stepeničastog etalona 12
Slika 7. Prikaz kritičnih dimenzija etalona br. 1 14
Slika 8. Trokoordinatni mjerni uređaj i mjerno ticalo 16
Slika 9. Digitalni mikrometar 16
Slika 10. 2D optički mjerni uređaj 17
Slika 11. Prikaz mjerenja širine etalona br. 1 digitalnim mikrometrom 17
Slika 12. Prikaz mjerenja tolerancija etalona br. 1 CMM-om 17
Slika 13. Prikaz površine 300 mm x 100 mm (D) etalona br. 1 21
Slika 14. Prikaz površine 300 mm x 100 mm (L) etalona br. 1 21
Slika 15. Prikaz mjerne površine kod R100 mm etalona br. 1 21
Slika 16. Prikaz kritičnih dimenzija etalona br. 2 22
Slika 17. Prikaz mjerne površine kod R50 mm etalona br. 2 26
Slika 18. Prikaz mjerne površine kod R25 mm etalona br. 2 26
Slika 19. Prikaz kritičnih dimenzija stepenastog etalona 27
Slika 20. Stepeničasti etalon 28
Slika 21. Jednoosni mjerni uređaj 28
Slika 22. Prikaz strategije mjerenja debljine stepenastog etalona 29

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz postojećih etalona za ultrazvučno ispitivanje 3
Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (2D optički uređaj) 18
Tablica 3. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (CMM)..... 18
Tablica 4. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (hrapavost)..... 19
Tablica 5. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (mikrometar)..... 20
Tablica 6. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (2D optički uređaj) 23
Tablica 7. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (hrapavost)..... 24
Tablica 8. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (mikrometar)..... 25
Tablica 9. Prikaz izmjerenih vrijednosti prve stepenice stepeničastog etalona 29
Tablica 10. Prikaz izmjerenih vrijednosti druge stepenice stepeničastog etalona 30
Tablica 11. Prikaz izmjerenih vrijednosti treće stepenice stepeničastog etalona..... 31
Tablica 12. Prikaz izmjerenih vrijednosti četvrte stepenice stepeničastog etalona..... 32
Tablica 13. Prikaz izmjerenih vrijednosti pete stepenice stepeničastog etalona..... 33
Tablica 14. Prikaz izmjerenih vrijednosti šeste stepenice stepeničastog etalona..... 34
Tablica 15. Prikaz izmjerenih vrijednosti sedme stepenice stepeničastog etalona 35
Tablica 16. Prikaz izmjerenih vrijednosti osme stepenice stepeničastog etalona 36
Tablica 17. Rezultati mjerenja na stepeničastom etalonu 37
Tablica 18. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti..... 44

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Naziv
u_c	µm	Sastavljena standardna nesigurnost
U	µm	Proširena nesigurnost
c_i	-	Koeficijent osjetljivosti
n	-	Broj ponovljenih mjerenja
d	mm	Debljina etalona
$u(d_V)$	µm	Izmjerena debljina etalona
$u(\delta d_I)$	µm	Utjecaj mjernog instrumenta
$\mathrm{u}(\delta d_T)$	°C	Utjecaj razlike temperature
δd_F	µm	Utjecaj mjerne sile
Δt	°C	Razlika temperature
α_V	K^{-1}	Koeficijent linearnog širenja valjčića
α_I	K^{-1}	Koeficijent linearnog širenja uređaja
s_p	µm	Zbirno procijenjeno standardno odstupanje
k	-	Faktor pokrivanja

SAŽETAK

Ultrazvučno ispitivanje uključuje funkcionalno zavisne elemente - ultrazvučni uređaj, ultrazvučne sonde i radne etalone. O odabiru elemenata i njihovih značajki ovise radne karakteristike ultrazvučnog sustava. U primjeni su česti radni etaloni br. 1 i br. 2 čije su dimenzionalne značajke propisane normama EN ISO 2400:2012 i EN ISO 7963:2010, kao i stepeničasti radni etalon čije su dimenzionalne značajke propisane normom ISO/DIS 16946:2012.

U radu su izdvojene kritične dimenzije na radnim etalonima br. 1 i br. 2 stepeničastom etalonu koje je potrebno pouzdano izmjeriti kako bi se ostvarila njihova namjena - podešavanje vrijednosti parametara brzine ultrazvuka ultrazvučnog uređaja u cilju ostvarivanja pouzdanih rezultati ispitivanja.

Mjerenja kritičnih dimenzija na radnim etalonima provedena su u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina.

Ključne riječi: radni etalon, ultrazvučno ispitivanje, dimenzionalno mjeriteljstvo, sljedivost

SUMMARY

Ultrasonic examination includes functional dependent elements - ultrasonic device, ultrasound and calibration block. The working characteristic of the ultrasound system depend on the choice of elements and their features. Most often are used calibration block no.1, calibration block no. 2 and step wedge calibration block whose dimensional features are described by EN ISO 2400: 2012, EN ISO 7963: 2010 and ISO / DIS 16946: 2012.

In this paper critical dimensions on calibration blocks no.1, no. 2 and step wedge calibration block are presented that need to be reliably measured in order to achieve their purpose - setting the speed parameter of the ultrasound in order to achieve reliable test results.

Measurement of critical dimensions on calibration blocks were performed in the Laboratory for Precise Measurement of Length.

Key words: calibration block, ultrasonic examination, dimensional metrology, traceability

1. UVOD

Danas kada se tehnologija brzo razvija i postaje prisutnija u našem svakodnevnom životu potrebno je imati što bolji način ispitivanja koji bi nam omogućio smanjenje rizika na minimum. Sve više se teži ispitivanju kvalitete proizvoda bez utjecaja na početnu strukturu i svojstva materijala (razaranje materijala) bilo zbog njegove visoke cijene proizvodnje ili nemogućnosti primjene destruktivnih ispitnih metoda.

Ispitivanje ultrazvukom jedna je od metoda ispitivanja proizvoda bez razaranja. Posebno je prikladna za otkrivanje grešaka tipa pukotina, te se mogu detektirati i druge greške u materijalu poput plinskih mjehurića, uključaka troske, i dr.

Tipično ultrazvučno ispitivanje sastoji se od nekoliko funkcionalnih cjelina, kao što su ultrazvučni uređaj, ultrazvučne sonde, etaloni i referentni uzorci te druga pomoćna oprema. Namjena etalona za ultrazvuk je podešavanje vrijednosti parametara brzine čime se može znatno utjecati na dobivene rezultate mjerenja i ispitivanja. U normama se navode i sistematiziraju tehnički zahtjevi u pogledu postava mjernih parametara za određivanje brzine ultrazvuka, no u ovom diplomskom radu naglasak je na mjerenja kritičnih dimenzija etalona.

Kako bi se osiguralo pouzdano ispitivanje ultrazvukom potrebno je, prilikom postupka podešavanja parametara ispitnog uređaja, koristiti etalon s pouzdanim i sljedivim mjernim značajkama. Odnosno, potrebno je provesti umjeravanje etalona za ultrazvuk.

Umjeravanje se definira kao skup postupaka kojima se u određenim uvjetima uspostavlja odnos između vrijednosti veličina koje pokazuje neko mjerilo ili mjerni sustav ili vrijednosti koje prikazuje neka mjera tvari ili referencijska tvar i odgovarajućih vrijednosti ostvarenih etalonima. [1]

U ovome radu će se razraditi metoda umjeravanja etalona za ultrazvučno ispitivanje, pri čemu će se razmatrati zahtjevi triju relevantnih normi:

ISO 2400:2012: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom -Specifikacija za radni etalon br. 1

ISO 7963:2010: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija radnog etalona br. 2 i

ISO/DIS 16946:2012: nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - specifikacija za stepeničasti etalon.

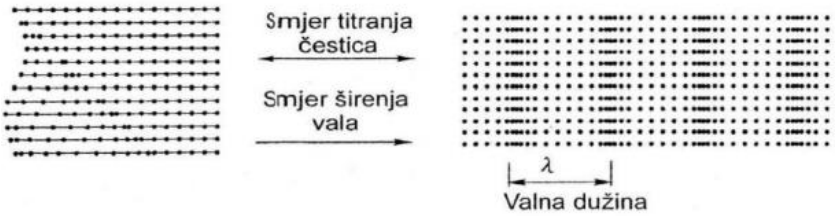
2. ETALONI ZA ULTRAZVUČNO ISPITIVANJE

Ultrazvuk je vrsta mehaničkih valova frekvencije 20 kHz do 10 GHz, a kod ispitivanja materijala najčešće se koriste frekvencije od 0,5 MHz do 10 MHz. Iako postoje različite tehnike ultrazvučnog ispitivanja, obično se u praksi koristi tehnika odjeka i tehnika prozvučavanja, pri čemu se koriste ravne i/ili kutne ultrazvučne sonde. Iako je ultrazvučna metoda posebno prikladna za otkrivanje grešaka tipa pukotina (ravninske ili planarne greške), ovom je metodom moguće detektirati i druge greške (uključke troske, plinske mjehuriće, mjehuriće u nizu).

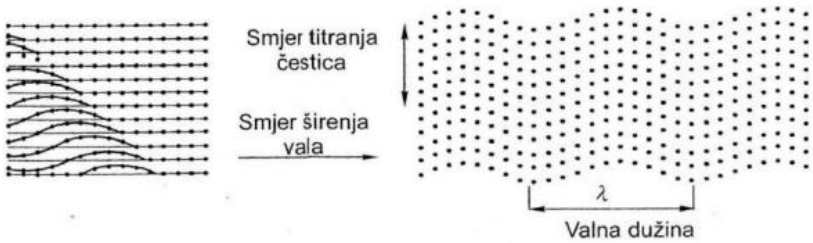
Longitudinalni i transverzalni valovi su dva najčešća načina širenja valova najčešće korištenih u ultrazvučnom ispitivanju. Na slikama 1 i 2 prikazani su longitudinalni i transverzalni valovi u trenutku nastajanja, te način titranja čestica pomoću zamišljenih čestica kojima se stanje titranja uobičajeno prikazuje. [2]

Longitudinalni val – uzdužni val (L-val), je onaj val kod kojega čestice titraju u smjeru širenja vala. L-valova stoga uzrokuju zgušćenja i razrjeđenja u sredstvu u kojem se šire. Longitudinalni valovi mogu se prostirati u sva tri agregatna stanja.

Transverzalni val – poprečni val (T-val), je onaj val kod kojega čestice titraju okomito na smjer širenja vala. Transverzalni valovi se mogu širiti samo u krutim sredstvima. [2]



Slika 1. Nastajanje longitudinalnog vala [2]



Slika 2. Nastajanje transverzalnog vala [2]

Namjena etalona za ultrazvuk je podešavanje vrijednosti parametara brzine ultrazvuka ultrazvučnog uređaja kako bi se ostvarili pouzdani i sljedivi rezultati ispitivanja.

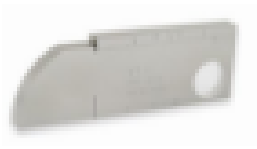
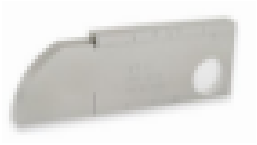
Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata ili vrijednosti kojeg etalona po kojemu se on može dovesti u vezu s navedenim referencijskim etalonima (obično državnim ili međunarodnim) neprekinutim lancem usporedaba koje imaju utvrđene mjerne nesigurnosti.

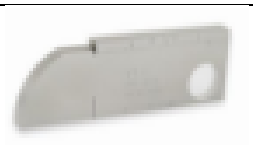
Etaloni za ultrazvučno ispitivanje dolaze u mnogim oblicima i veličinama. Izbor etalona ovisi o značajkama predmeta koji se ispituje. Materijal referentnog etalona trebao bi biti isti kao i materijal koji se ispituje, a umjetno inducirani nedostatak trebao bi odgovarati stvarnom nedostatku. Ovaj drugi zahtjev je glavno ograničenje većine standardiziranih referentnih etalona. Većina je izvedena ubušenim cilindrima i zarezima koji ne predstavljaju stvarne nedostatke. [3]

Izrada više "realističnih" nedostataka predstavlja previsoke troškove, te je stoga samom ispitivaču prepuštena procjena izbora prikladnog etalona.

Tablica 1 donosi pregled etalona za ultrazvučno ispitivanje koji se uobičajeno koriste, uz navođenje norme koja propisuje njihove značajke.

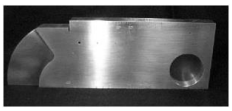
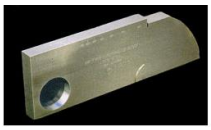
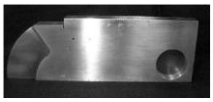
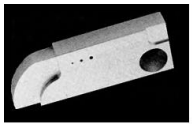
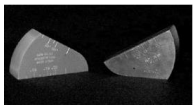
Tablica 1. Prikaz postojećih etalona za ultrazvučno ispitivanje [3][4]

Oznaka etalona	Norma	Dimenzije mm	Materijal
Etalon br. 1 	ISO 2400:2012	25 x 100 x 300	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon br. 1 	ISO 2400:2012	50 x 100 x 300	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon br. 1 (A2)	BS2704	25 x 100 x 300	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij

			
Etalon br. 2 	ISO 7963:2010	Debljine 12,5 mm	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon br. 2 	ISO 7963:2010	Debljine 20 mm	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon br. 2 (A4) 	BS2704	Debljine 12,5 mm	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon br. 2 (A4) 	BS2704	Debljine 20 mm	Ugljični čelik Nehrđajući čelik Aluminij
Etalon A5 	BS2704	50 x 75 x 315	Ugljični čelik Nehrđajući čelik
Etalon A6 	BS2704	25 x 50 x 150	Ugljični čelik Nehrđajući čelik

Oznaka etalona	Norma	Dimenzije " ili mm	Materijal
Stepeničasti etalon sa 4 stepenice 	PH tool reference standards-katalog 2013god. (ASTM E797)	(250", 500", 750" , 1000") x 750" x 750"	Čelik razreda S355J0
Stepeničasti etalon sa 5 stepenica 	PH tool reference standards-katalog 2013god. (ASTM E797)	(100", 200", 300" ", 400") x 750" x 750"	Čelik razreda S355J0
Zakrivljeni stepeničasti etalon za 90 ° sa 5 stepenica 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	Debljine: (100", 200", 300", 400" i 500") radius 0,5"	Čelik razreda S355J0
VW Stepeničasti etalon sa 8 stepenica 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 7,0; 8,0) mm x15mm x 15mm	Čelik razreda S355J0

Tanki stepeničasti etalon 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(0,040", 0,060", 0,080", 0,100") x 0,750" x 0,750"	Čelik razreda S355J0
„Magna“ tanki stepeničasti etalon 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(0,020", 0,040", 0,060", 0,080") x 0,750" x 0,750"	Čelik razreda S355J0
Stepeničasti etalon sa 10 stepenica 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	Od 2 mm do 20 mm sa stepenicama po 2 mm x 20 mm x 20 mm	Čelik razreda S355J0
„Tipsy“ stepeničasti etalon 	PH tool reference standards-katalog 2013god.	(25,0; 37,5; 50,0; 62,5; 75,0; 87,5; 100,0; 112,5) mm x 25 mm x 25 mm	Čelik razreda S355J0

Oznaka etalona	Norma	Materijal
IIW 	ASTM E172	Ugljični čelik Nehrđajući čelik
IIW Tip US-1 	ASTM E172	Ugljični čelik Nehrđajući čelik
IIW Tip US-2 	ASTM E172	Ugljični čelik Nehrđajući čelik
IIW Tip Mini 	ASTM E172	Ugljični čelik Nehrđajući čelik
Minijaturni kutni ili ROMPAS etalon 	ASTM E172	Ugljični čelik Nehrđajući čelik

U ovom radu provedeno je umjeravanje etalona tipa br. 1, br. 2 i stepeničastog etalona opisanih u idućem poglavlju prema odgovarajućim normama. Odabrani su oni etaloni koji se vrlo često koriste u području nerazornih ispitivanja na prostorima država EU i mjerene su samo kritične dimenzije na odabranim etalonima.

3. KARAKTERISTIKE ETALONA BR. 1, BR. 2 I STEPENIČASTOG ETALONA PREMA RELEVANTNIM NORMAMA

Naglasak ovog diplomskog rada je izbor i mjerenje karakterističnih veličina odabranih etalona prema odgovarajućim normama, pri tome razmatrajući samo duljinske mjere etalona, ne i mjerenja odgovarajućih brzina potrebnih za ultrazvučna ispitivanja.

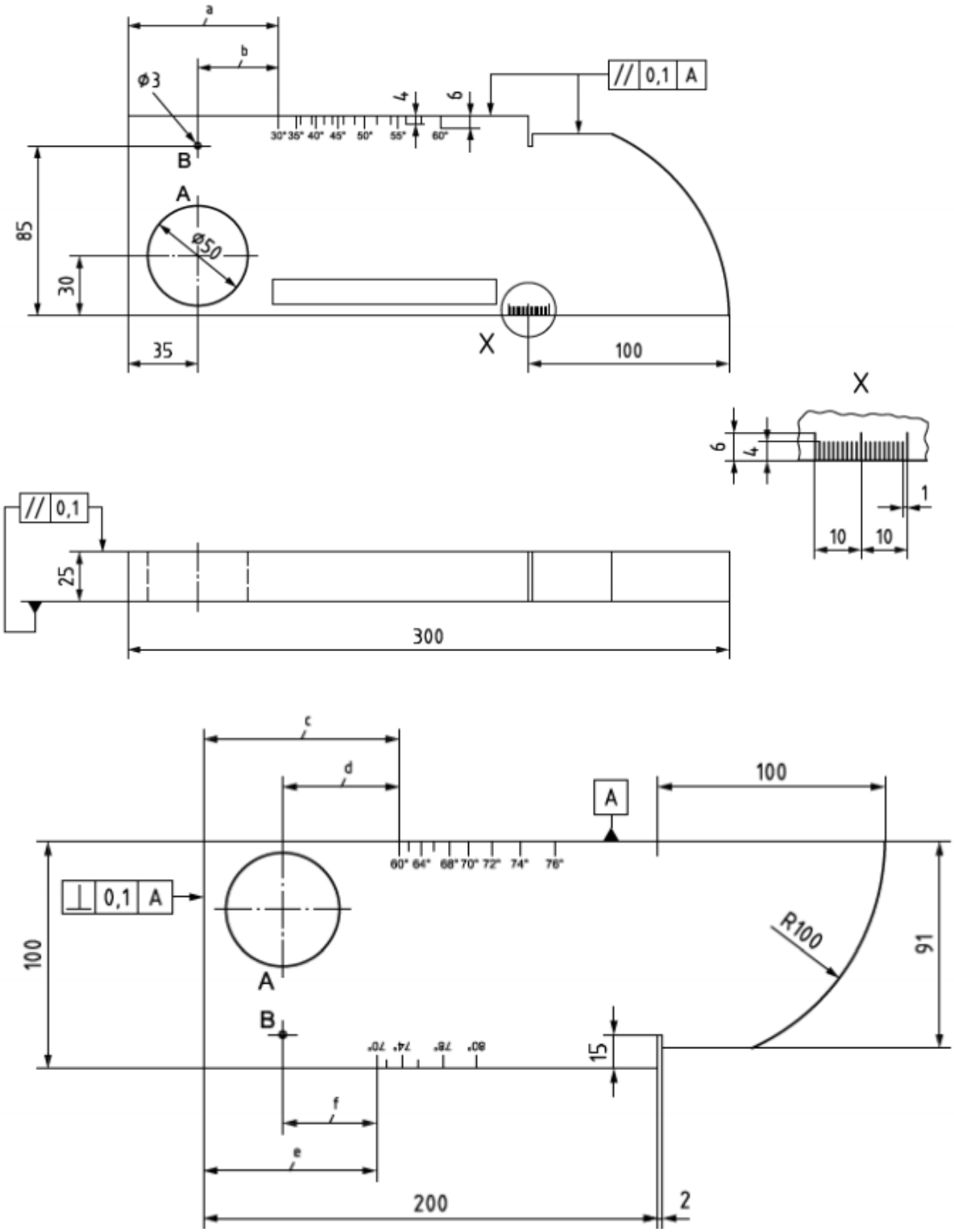
3.1. ISO 2400:2012: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom -Specifikacija za radni etalon br. 1 [5]

Ova norma propisuje zahtjeve za dimenzijama, materijalom i proizvodnjom etalona izrađenog od čelika, a koji se koristi za prilikom podešavanja radnih značajki ultrazvučnih uređaja. Norma ISO 2400:2012 navodi i oznaku etalona - br. 1 kako bi se razlikovao od ostalih etalona definiranih drugim normama.

Etaloni moraju biti izrađeni od čelika razreda S355JO.

Dimenzije etalona br.1 prikazane su na slici 4.
Etaloni moraju biti obrađeni grubo s dimenzijama 320 mm x 120 mm x 30 mm.

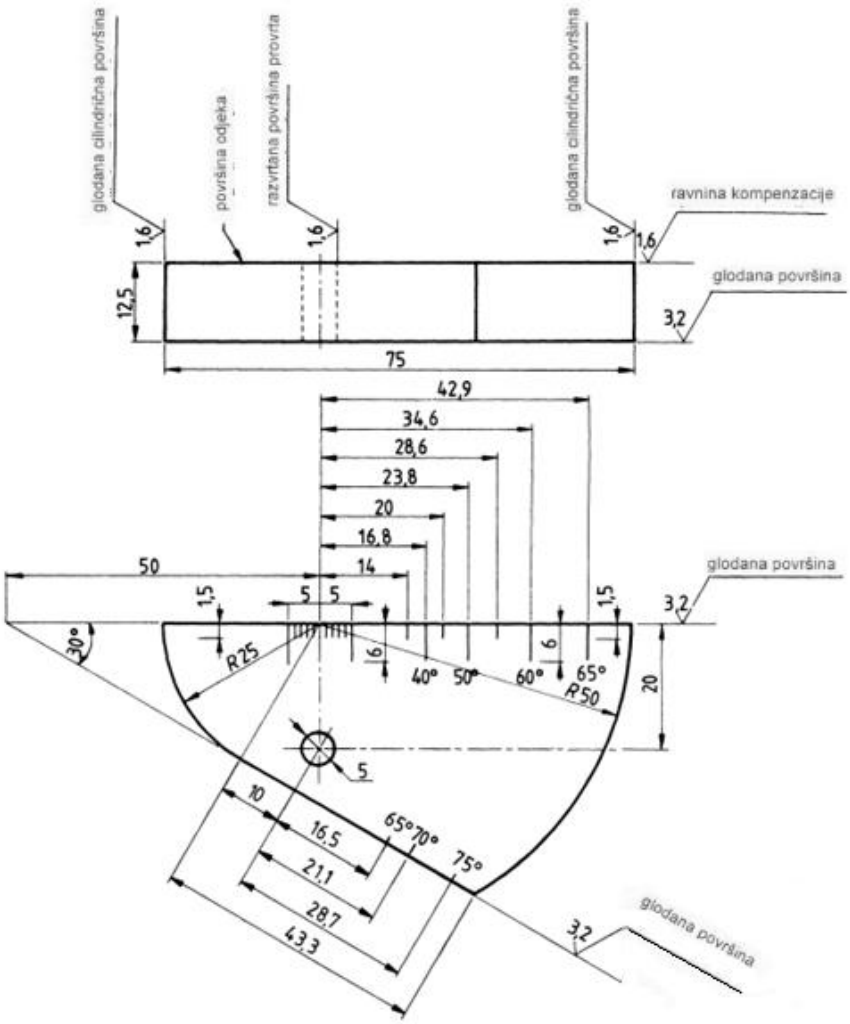
Sve vanjske površine obrađuju se do vrijednosti parametra hrapavosti $Ra \leq 0{,}8$ μm.



Slika 3. Dimenzije etalona br. 1

3.2. ISO 7963:2010: Nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za radni etalon br. 2 [6]

Ova norma definira dimenzije, materijal, proizvodnju i metode uporabe etalona br. 2 radi umjeravanja i provjere ultrazvučnih ispitnih uređaja. Ovaj etalon razlikuje se od veličine i oblika etalona opisanog u normi i ISO 2400:2012. Mnogo je manji i lakši te je njegova geometrija jednostavnija u odnosu na etalon br.1. Njegovo jednostavno korištenje omogućuje provjere postavki vremenske baze i osjetljivosti ultrazvučnog uređaja. Prikladan je za provjeru kuta snopa i indeksa minijaturne transverzalne sonde. Dimenzije etalona dane su na slici 5.



Slika 4. Dimenzije etalona br.2

Dopuštenja odstupanja dimenzija su ± 0,1 mm, osim kod duljine ugravirane ljestvice gdje je definirano dopušteno odstupanje ± 0,5 mm. Etalon br. 2 izrađen je od čelika sastava koji odgovara P 18 ISO 2604-4.

Za umjeravanje "ne-minijaturnih" sondi, norma ISO 7963:2010 predviđa i mogućnost uporabe etalona s visinama 20 mm ili 25 mm.

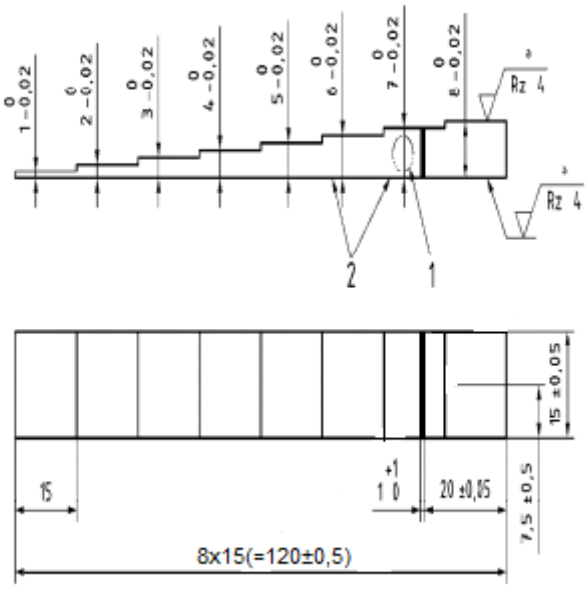
Etalon br. 2 mora biti homogen, bez nedostataka otkrivenih ultrazvučnim ispitivanjem.

3.3. ISO/DIS 16946:2012: Nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za Stepeničasti etalon [7]

Ova norma definira dimenzije, materijal, proizvodnju i metode uporabe stepeničastog etalona radi umjeravanja i provjere ultrazvučnih ispitnih uređaja. Dimenzije etalona su prikazane na slici 8.

Odstupanja su ± 0,1 mm za duljinu i širinu bloka, zatim -0,02 mm za visinu koraka do 12,5 mm i -0,1 mm za sve ostale veće visine.

Stepeničasti etalon mora biti izrađen od čelika razreda S355J0 u skladu s EN 10025-2 ili iz ekvivalentnog razreda čelika.



Slika 5. Dimenzije stepeničastog etalona

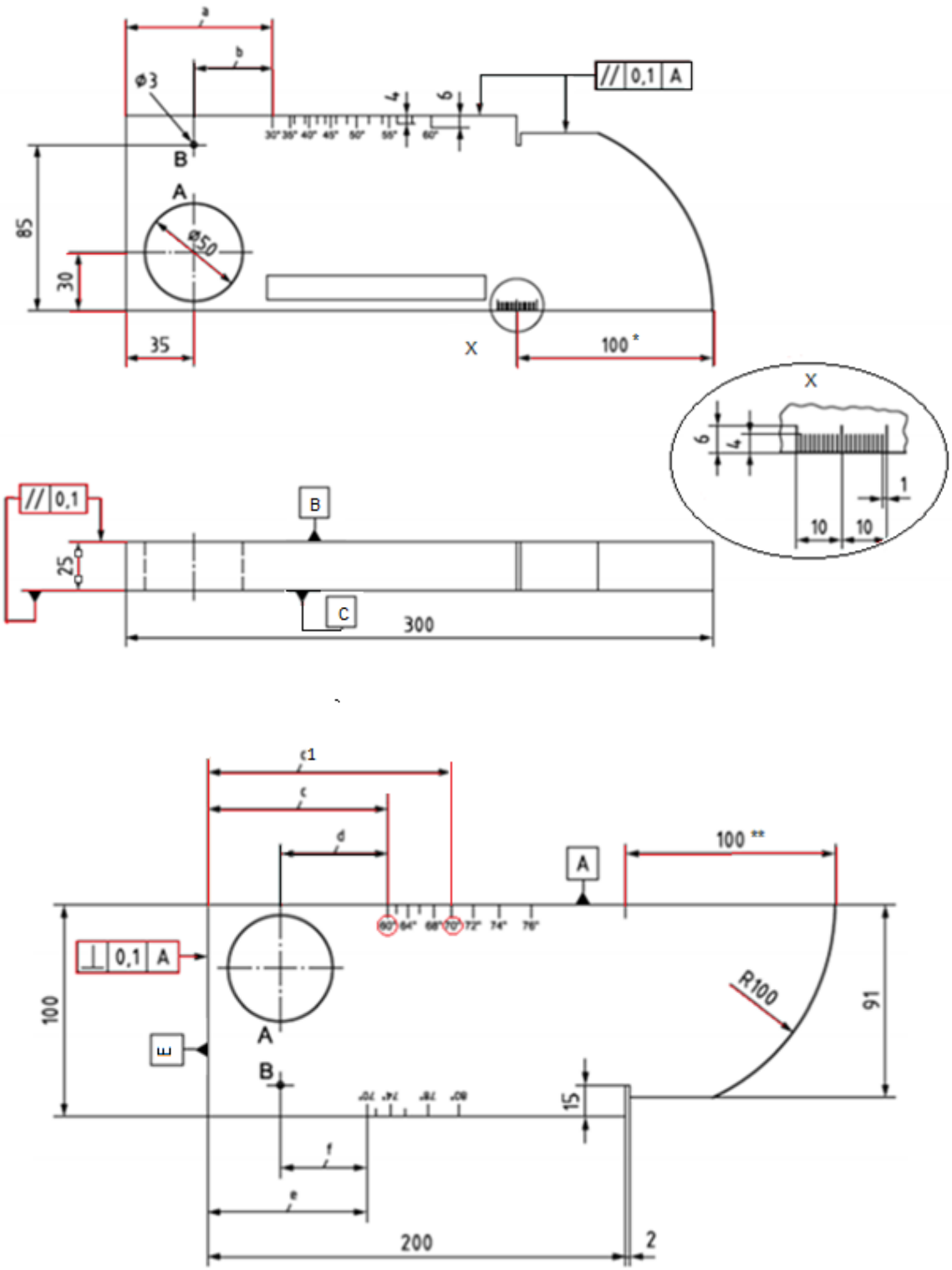
4. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA ETALONA BR.1

Norma HRN EN ISO 2400:2012 *Nerazorno ispitivanje -- Ultrazvučno ispitivanje -- Specifikacija za radni etalon br. 1* propisuje duljinske mjere i tolerancije duljinskih mjera, tolerancije orijentacije (paralelnost i okomitost), te zahtijevano stanje teksture površine temeljem maksimalne dopuštene vrijednosti parametra hrapavost na svim vanjskim površinama $Ra \leq 0{,}8\ \mu m$ te toleranciju oblika - ravnost.

Prema savjetima prof. dr. sc. Damira Markučiča, a uvažavajući njegovo dugogodišnje iskustvo u području ultrazvučnog ispitivanja kritične dimenzije koje je potrebno utvrditi na radnom etalonu br. 1 naznačene su na slici br. 9 crvenom bojom.

Radi jednoznačnog označavanja mjerne površine na tehničkom nacrtu označene su na sljedeći način:

Baza		Površina
A	-	300 mm x 25 mm
B	-	300 mm x 100 mm L
C	-	300 mm x 100mm D
E	-	100 mm x 25 mm



Slika 6. Prikaz kritičnih dimenzija etalona br. 1

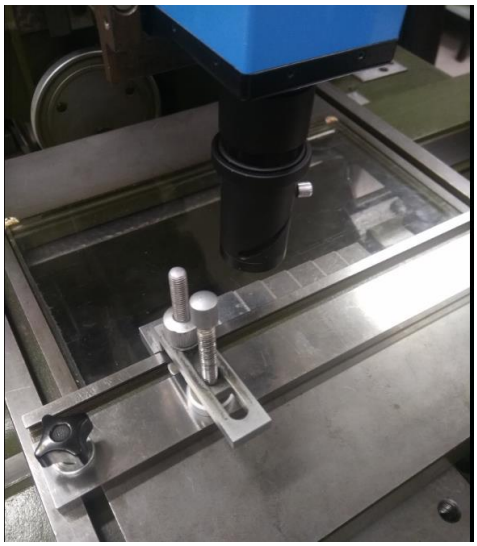
S obzirom na različite mjerne veličine koje je potrebno izmjeriti na radnom etalonu br. 1, bilo je potrebno koristiti i različite mjerne uređaje. Uvažavajući mjerenu veličinu i definiranu toleranciju, mjerenja su provedena korištenjem sljedeće mjerne opreme:

Mjerni uređaj	Mjerena veličina mm
Trokoordinatni mjerni uređaj (CMM)	Paralelnost P2 na bazu C Ravnost: A, B, C, D Okomitost P3 na bazu A
2D optički mjerni uređaj	100*, a=105, 35, 30, *R* 100, *Φ* 50, c=87, c1=117.4
Mikrometar za vanjska mjerenja	25
Uređaj za ispitivanje hrapavosti	300 mm x 100 mm (D)
	300 mm x 25 mm
	100 mm x 25 mm
	R 100 mm
	200 mm x 25 mm
	300 mm x 100 mm (L)
	40 mm x 25 mm

Na slikama od 8 do 12 prikazani su korišteni mjerni uređaji u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina.

Slika 7. Trokoordinatni mjerni uređaj i mjerno ticalo

Slika 8. Digitalni mikrometar



Slika 9. 2D optički mjerni uređaj

Slika 10. Prikaz mjerenja širine etalona br. 1 digitalnim mikrometrom

Slika 11. Prikaz mjerenja tolerancija etalona br. 1 CMM-om

Tablica 2. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (2D optički uređaj)

Dimenzije, mm	Tolerancije, mm	Mjerenje br. 1, mm	Mjerenje br. 2, mm	Mjerenje br. 3, mm	Aritmetička sredina $\bar{x}$, mm	Mjerna nesigurnost U, µm
100 *	0,1	99,898	99,901	99,905	99,901	20
a =105	0,5	104,855	104,893	104,883	104,877	20
35	0,1	34,837	34,863	34,871	34,857	20
30	0,1	29,919	29,915	29,916	29,917	20
c=87	0,5	86,865	86,842	86,821	86,843	20
c1=117.4	0,5	117,373	117,377	117,373	117,374	20
R 100	0,1	100,112	100,142	100,102	100,119	30
Φ 50	0,1	50,110	50,142	50,102	50,118	30

U tablici 3 prikazana su odstupanja od paralelnosti, ravnosti i okomitosti koje je potrebno utvrditi za ultrazvučni etalon br. 1, a koja su provedena korištenjem trokoordinatnog mjernog uređaja. Prema normi HRN EN ISO 2400:2012 tolerancija za sve značajke iz tablice 3 iznosi 0,1 mm.

Tablica 3. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (CMM)

Značajka tolerancije		Rezultati mjerenja, mm			Aritmetička sredina $\bar{x}$, mm	Mjerna nesigurnost U, µm
		Mjerenje br. 1	Mjerenje br. 2	Mjerenje br. 3		
Paralelnost P2 na bazu C		0,023	0,029	0,031	0,028	10
Ravnost	A	0,013	0,013	0,014	0,013	5
	C	0,022	0,023	0,022	0,022	
	B	0,025	0,023	0,025	0,024	
	E	0,012	0,014	0,010	0,012	
Okomitost P3 na bazu A		0,011	0,014	0,012	0,011	10

S ciljem utvrđivanja stanja hrapavosti površina, na svakoj mjernoj površini iz tablice 4 provedeno je mjerenje parametra *Ra* na 5 profila hrapavosti. U tablici 4 prikazane su izmjerene aritmetičke sredine vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* na radnom etalonu. Prema normi HRN EN ISO 2400:2012 tolerancija parametra hrapavosti *Ra*, za sve mjerene površine, iznosi $Ra \leq 0{,}8$.

Rezultati mjerenja hrapavosti i profili hrapavosti nalaze se u prilogu 1.

Tablica 4. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (hrapavost)

Mjerne površine	Dopušteno odstupanje *Ra*, µm	Izmjereno odstupanje *Ra*, µm	Mjerna nesigurnost *U*, µm
300 mm x 100 mm (D)	≤ 0,8	1,12	0,1
300 mm x 25 mm		0,64	
100 mm x 25 mm		0,60	
R 100 mm		0,65	
200 mm x 25 mm		0,45	
300 mm x 100 mm (L)		1,12	
40 mm x 25 mm		0,76	

U tablici 5 prikazane su izmjerene vrijednosti debljine etalona br. 1 ostvarene korištenjem mikrometra za vanjska mjerenja. Za navedenu veličinu norma HRN EN ISO 2400:2012 definira toleranciju u iznosu od 0,1 mm.

Tablica 5. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 1 (mikrometar)

Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm
1.	25,037	6.	25,042	11.	25,034	16.	25,031
2.	25,029	7.	25,042	12.	25,046	17.	25,027
3.	25,044	8.	25,037	13.	25,041	18.	25,029
4.	25,038	9.	25,030	14.	25,026	19.	25,045
5.	25,043	10.	25,038	15.	25,033	20.	25,042

Aritmetička sredina =25,037 mm

Mjerna nesigurnost U = 15 μm, k =2, P = 95 %

U tablicama 2 i 4 sivo su osjenčani rezultati koji se nalaze izvan zadanih granica tolerancija- dimenzije 35 mm, R 100 mm i Φ 50 mm, te vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* na površinama 300 mm x 100 mm (D) i 300 mm x 100 mm (L).

Već se vizualnim pregledom mjernih površina 300 mm x 100 mm (D) i (L) mogu se utvrditi brojna oštećenja koja posljedično rezultiraju većim vrijednostima parametra hrapavosti *Ra* (slike 13, 14). Odstupanje mjerene veličine R 100 od zadane tolerancije moglo bi se pripisati samoj obradi te površine (slika 15).

Od svih duljinskih mjera, mjerenje promjera korištenjem 2D optičkog mjernog uređaja smatra se najzahtjevnijom mjerenom veličinom. Može se pretpostaviti da je odstupanje mjerene veličine Φ 50 od zadane tolerancije, kao i njoj izvedene mjere – mjerene veličine 35 mm s jedne strane posljedica malog broja rezultata mjerenja, temeljem kojih je ostvarena mjera promjera, ali i lošeg površinskog stanja etalona br.1 vidljivog sa slike 14.

Slika 12. Prikaz površine 300 mm x 100 mm (D) etalona br. 1

Slika 13. Prikaz površine 300 mm x 100 mm (L) etalona br. 1

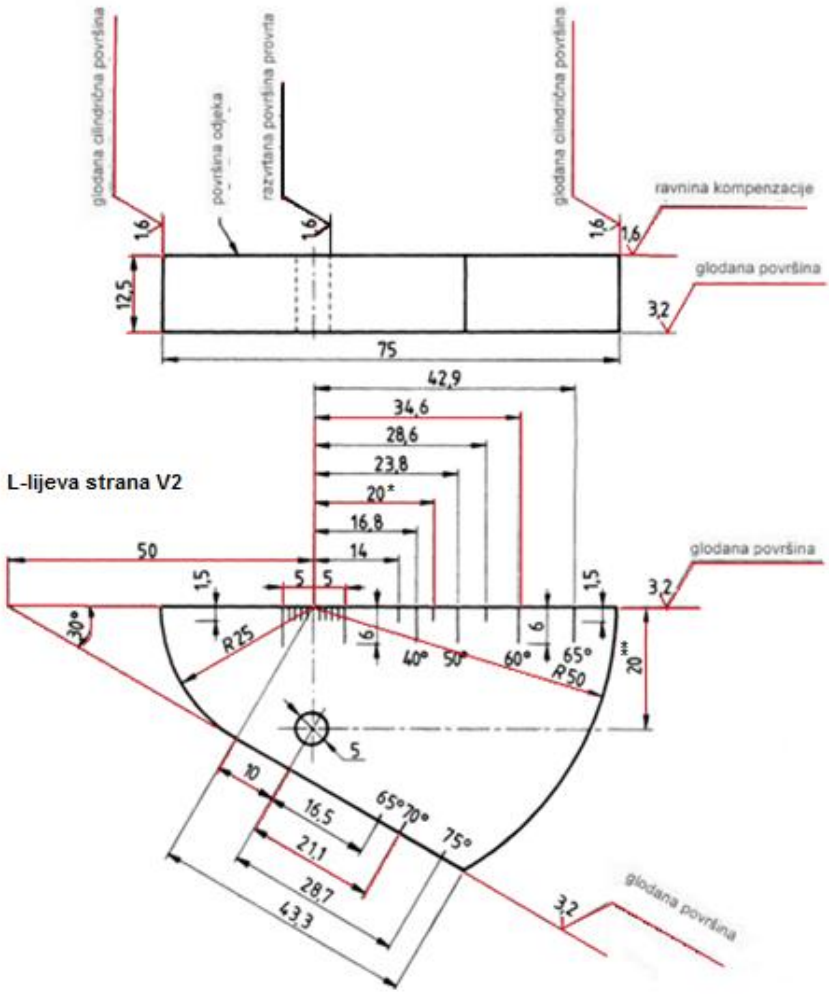
Slika 14. Prikaz mjerne površine kod R100 mm etalona br. 1

5. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA ETALONA BR.2

Norma HRN EN ISO 7963:2010: *Nerazorno ispitivanje -- Ispitivanje ultrazvukom -- Specifikacija radnog etalona br. 2* propisuje propisane su duljinske mjere i tolerancije duljinskih mjera, te zahtjev na stanje hrapavosti površina.

Prema savjetima prof. dr. sc. Damira Markučič, a uvažavajući njegovo dugogodišnje iskustvo u području ultrazvučnog ispitivanja, na slici 16 su crvenom bojom naznačene kritične dimenzije koje je potrebno utvrditi na etalonu tipa br. 2.

Radi jednoznačnog označavanja površina na crtežima su označene slovom L lijeva strana i slovom D desna stranu etalona br. 2.



Slika 15. Prikaz kritičnih dimenzija etalona br. 2

S obzirom na različite mjerne veličine koje je potrebno izmjeriti na radnom etalonu br. 2, bilo je potrebno koristiti i različite mjerne uređaje. Uvažavajući mjerenu veličinu i definiranu toleranciju mjerenja su provedena na sljedeći način:

Mjerni uređaj	Mjerena veličina mm
2D optički mjerni uređaj	30 °, 50, Ø 5, 20(*) , 20(**) *R* 25, *R* 50, 10, 21.1, 34.6,
Mikrometar za vanjska mjerenja	12,5
Uređaj za ispitivanje hrapavosti	Površina uz *R* 25 mm
	Površina uz *R* 50 mm
	75 mm x 12,5 mm
	43,3 mm x 12,5 mm
	L
	D

Tablica 6. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (2D optički uređaj)

Mjerene veličine	Tolerancije	Mjerenje br. 1	Mjerenje br. 2	Mjerenje br. 3	Aritmetička sredina $\bar{x}$, mm	Mjerna nesigurnost U
30 °	0,5 °	30,00 °	29,97 °	29,96 °	29,977	0,3 °
50 mm	0,1 mm	49,807 mm	49,875 mm	49,874 mm	49,852	20 µm
Ø 5 mm	0,1 mm	4,955 mm	4,970 mm	4,955 mm	4,96	30 µm
20 mm (**)	0,1 mm	19,985 mm	19,967 mm	19,969 mm	19,974	20 µm

R 25 mm	0,1 mm	24,732 mm	24,745 mm	24,732 mm	24,736	30 µm
R 50 mm	0,1 mm	50,043 mm	50,074 mm	50,053 mm	50,057	30 µm
10 mm	0,5 mm	9,986 mm	9,968 mm	9,984 mm	9,979	20 µm
21,1 mm	0,5 mm	20,888 mm	20,874 mm	20,885 mm	20,882	20 µm
20 mm (*)	0,5 mm	20,003 mm	20,009 mm	20,011 mm	20,007	20 µm
34,6 mm	0,5 mm	34,607 mm	34,601 mm	34,609 mm	34,606	20 µm

S ciljem utvrđivanja stanja hrapavosti površina, na svakoj mjernoj površini iz tablice 7 provedeno je mjerenje parametra *Ra* na 5 profila hrapavosti. U tablici 7 prikazane su izmjerene aritmetičke sredine vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* na radnom etalonu. Tolerancija parametra hrapavosti *Ra*, za sve mjerene površine, navedena je u tablici 7 norme HRN EN ISO 2400:2012. Rezultati mjerenja hrapavosti i profili hrapavosti nalaze se u prilogu 2.

Tablica 7. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (hrapavost)

Mjerne površine	Dopušteno odstupanje *Ra*, µm	Izmjereno odstupanje *Ra*, µm	Mjerna nesigurnost *U*, µm
Površina uz *R* 25 mm	≤ 1,6	1,70	0,1
Površina uz *R* 50 mm	≤ 1,6	1,74	
75 mm x 12,5 mm	≤ 3,2	0,59	
43,3 mm x 12,5 mm	≤ 3,2	1,75	
L	≤ 3,2	0,14	

D	≤ 1,6	0,24	

U tablici 8 prikazane su izmjerene vrijednosti debljine etalona br. 2 ostvarene korištenjem mikrometra za vanjska mjerenja. Za navedenu veličinu, norma HRN EN ISO 7963:2010 definira toleranciju u iznosu od 0,1 mm.

Tablica 8. Prikaz rezultata mjerenja na etalonu br. 2 (mikrometar)

Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm	Mjer. br.	Rezultat, mm
1.	12,528	6.	12,524	11.	12,519	16.	12,517
2.	12,517	7.	12,527	12.	12,520	17.	12,518
3.	12,523	8.	12,518	13.	12,525	18.	12,521
4.	12,520	9.	12,516	14.	12,524	19.	12,524
5.	12,521	10.	12,520	15.	12,519	20.	12,524

Aritmetička sredina =12,521 mm

Mjerna nesigurnost U = 15 μm, k =2, P = 95 %

U tablicama 6 i 7 sivo su osjenčani rezultati koji se nalaze izvan zadanih granica tolerancija- mjerene veličine 50 mm i R 25 mm, te vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* površina uz R 25 mm i R 50 mm.

Moguće je da su odstupanja rezultata mjerenja veličina 50 mm i R 25 mm od zadanih granica tolerancija rezultat odabranog mjernog sustava. Naime, željelo se izbjeći mjerenje dimenzija etalona br. 2 CMM-om, te utvrditi sve mjeren 2D optičkim mjernim uređajem, iako za mjerenja radijusa zakrivljenosti korišten sustav nije primjeren.

Vizualnim pregledom mjernih površina uz R 25 mm i R 50 mm mogu se uočiti manja oštećenja koja bi posljedično mogla rezultirati većim vrijednostima parametra hrapavosti *Ra* (slike 17, 18).

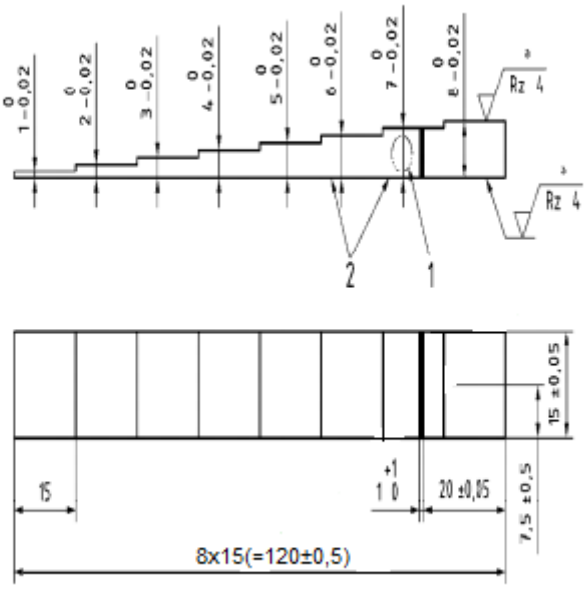
Slika 16. Prikaz mjerne površine kod R50 mm etalona br. 2

Slika 17. Prikaz mjerne površine kod R25 mm etalona br. 2

6. RAZRADA POSTUPKA MJERENJA STEPENIČASTOG ETALONA

Prema normi HRN EN ISO 16946:2017 *Nerazorno ispitivanje – Ultrazvučno ispitivanje – Specifikacija za stepeničasti radni etalon*, propisane su duljinske mjere i tolerancije duljinskih mjera, te zahtjev na stanje hrapavost površina.

Na slici 19 naznačene se dimenzije i tolerancije koje je potrebno utvrditi.



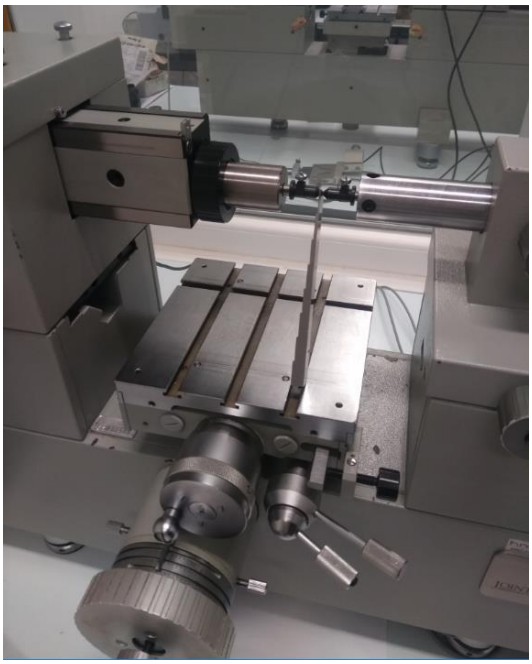
Slika 18. Prikaz kritičnih dimenzija stepenastog etalona

S obzirom na različite mjerne veličine koje je potrebno izmjeriti na stepeničastom radnom etalonu, bilo je potrebno koristiti i različite mjerne uređaje. Uvažavajući mjerenu veličinu i definiranu toleranciju mjerenja su provedena na sljedeći način:

Mjerni uređaj	Mjerena veličina, mm
Jednoosni mjerni uređaj (ULM)	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
Uređaj za ispitivanje hrapavosti	15 (širina)
	120
	15 (dužina)

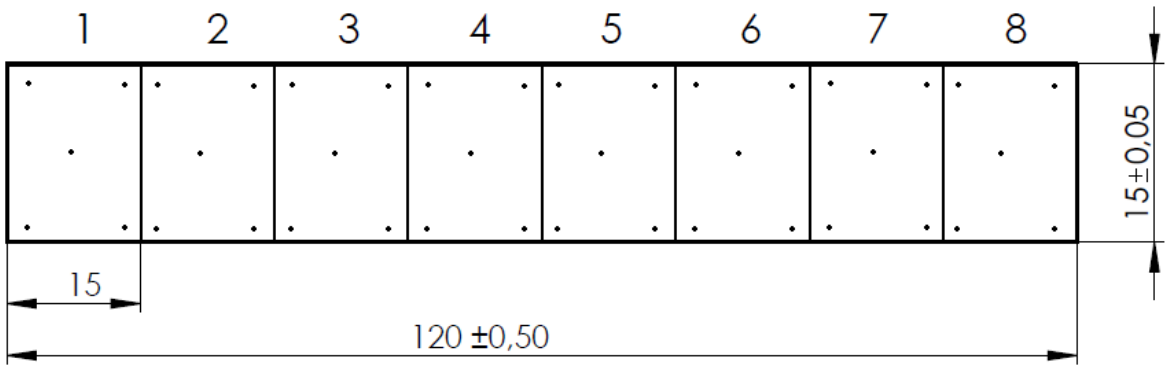
Provedena su mjerenja na stepeničastom etalonu (slika 20) korištenjem jednoosnog mjernog uređaja prikazanog na slici 21.

Slika 19. Stepeničasti etalon



Slika 20. Jednoosni mjerni uređaj

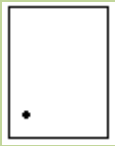
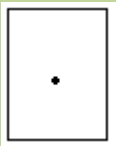
Na svakoj „stepenici“ stepeničastog etalona definirano je po pet mjernih mjesta, kako je prikazano slikom 22.



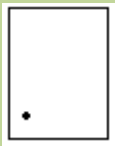
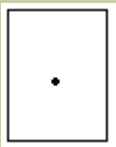
Slika 21. Prikaz strategije mjerenja debljine stepenastog etalona

Sve mjere u tablicama od 9 do 16 navedene su u mm, uz tolerancijsko polje od 0 mm do -0,02 mm. Mjerna nesigurnost rezultata iz tablica 9 do 16 iznosi U = 10 µm, k =2, P = 95 %.

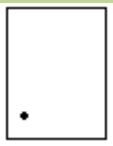
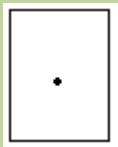
Tablica 9. Prikaz izmjerenih vrijednosti prve stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	1	0,9896	0,9866	0,9918	0,9895	0,9883
2.		0,9852	0,9842	0,9917	0,9895	0,9881
3.		0,9869	0,9829	0,9921	0,9905	0,9877
4.		0,9851	0,9865	0,9924	0,9908	0,9875
5.		0,9873	0,9830	0,9913	0,9910	0,9879
6.		0,9848	0,9829	0,9921	0,9878	0,9878
7.		0,9863	0,9832	0,9919	0,9903	0,9877
8.		0,9870	0,9838	0,9922	0,9882	0,9878
9.		0,9860	0,9838	0,9924	0,9879	0,9888
10.		0,9868	0,9832	0,9921	0,9878	0,9877
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		0,9865	0,9840	0,9920	0,9893	0,9879

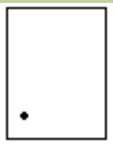
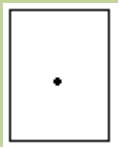
Tablica 10. Prikaz izmjerenih vrijednosti druge stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	2	1,9899	1,9891	1,9910	1,9906	1,9886
2.		1,9893	1,9898	1,9918	1,9907	1,9878
3.		1,9887	1,9897	1,9914	1,9902	1,9878
4.		1,9906	1,9901	1,9921	1,9902	1,9884
5.		1,9901	1,9894	1,9916	1,9905	1,9886
6.		1,9894	1,9890	1,9923	1,9805	1,9889
7.		1,9891	1,9891	1,9924	1,9911	1,9884
8.		1,9890	1,9890	1,9915	1,9894	1,9884
9.		1,9889	1,9897	1,9908	1,9894	1,9887
10.		1,9887	1,9893	1,9914	1,9908	1,9883
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		1,9893	1,9894	1,9916	1,9893	1,9884

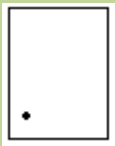
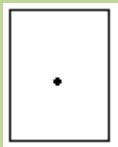
Tablica 11. Prikaz izmjerenih vrijednosti treće stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	3	2,9876	2,9843	2,9865	2,9881	2,9803
2.		2,9875	2,9835	2,9867	2,9884	2,9818
3.		2,9874	2,9845	2,9862	2,9881	2,9825
4.		2,9881	2,9848	2,9868	2,9885	2,9822
5.		2,9879	2,9841	2,9866	2,9877	2,9813
6.		2,9875	2,9849	2,9859	2,9879	2,9819
7.		2,9874	2,9838	2,9861	2,9885	2,9824
8.		2,9878	2,9844	2,9872	2,9888	2,9823
9.		2,9881	2,9845	2,9859	2,9891	2,9829
10.		2,9883	2,9840	2,9863	2,9890	2,9824
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		2,9877	2,9842	2,9864	2,9884	2,9820

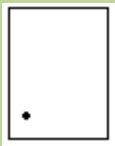
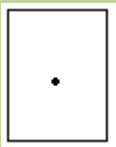
Tablica 12. Prikaz izmjerenih vrijednosti četvrte stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	4	3,9883	3,9831	3,9866	3,9891	3,9866
2.		3,9882	3,9825	3,9869	3,9893	3,9869
3.		3,9875	3,9816	3,9871	3,9890	3,9862
4.		3,9875	3,9823	3,9876	3,9892	3,9867
5.		3,9890	3,9814	3,9877	3,9891	3,9865
6.		3,9877	3,9827	3,9868	3,9888	3,9863
7.		3,9880	3,9818	3,9870	3,9889	3,9865
8.		3,9875	3,9833	3,9869	3,9891	3,9869
9.		3,9880	3,9817	3,9873	3,9889	3,9866
10.		3,9879	3,9823	3,9867	3,9895	3,9891
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		3,9879	3,9823	3,9871	3,9891	3,9868

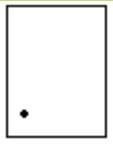
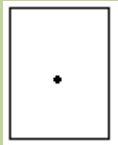
Tablica 13. Prikaz izmjerenih vrijednosti pete stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	5	4,9898	4,9898	4,9906	4,9900	4,9906
2.		4,9898	4,9901	4,9901	4,9899	4,9903
3.		4,9896	4,9899	4,9907	4,9894	4,9906
4.		4,9900	4,9894	4,9910	4,9903	4,9904
5.		4,9897	4,9902	4,9903	4,9893	4,9907
6.		4,9903	4,9899	4,9900	4,9891	4,9905
7.		4,9902	4,9900	4,9910	4,9897	4,9901
8.		4,9901	4,9893	4,9902	4,9896	4,9900
9.		4,9900	4,9900	4,9907	4,9898	4,9903
10.		4,9899	4,9902	4,9899	4,9893	4,9896
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		4,9899	4,9899	4,9904	4,9896	4,9903

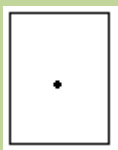
Tablica 14. Prikaz izmjerenih vrijednosti šeste stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	6	5,9906	5,9885	5,9897	5,9896	5,9892
2.		5,9904	5,9882	5,9898	5,9894	5,9890
3.		5,9907	5,9891	5,9891	5,9895	5,9888
4.		5,9906	5,9899	5,9896	5,9894	5,9890
5.		5,9907	5,9893	5,9897	5,9899	5,9889
6.		5,9905	5,9887	5,9899	5,9898	5,9889
7.		5,9906	5,9886	5,9892	5,9894	5,9889
8.		5,9910	5,9891	5,9895	5,9897	5,9888
9.		5,9908	5,9888	5,9892	5,9895	5,9889
10.		5,9907	5,9889	5,9894	5,9895	5,9891
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		5,9906	5,9889	5,9895	5,9896	5,9889

Tablica 15. Prikaz izmjerenih vrijednosti sedme stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	7	6,9887	6,9883	6,9872	6,9876	6,9880
2.		6,9885	6,9886	6,9871	6,9876	6,9873
3.		6,9885	6,9885	6,9874	6,9881	6,9876
4.		6,9887	6,9888	6,9878	6,9873	6,9877
5.		6,9885	6,9886	6,9876	6,9875	6,9879
6.		6,9888	6,9877	6,9880	6,9875	6,9873
7.		6,9880	6,9885	6,9870	6,9874	6,9876
8.		6,9883	6,9882	6,9874	6,9874	6,9876
9.		6,9884	6,9884	6,9879	6,9878	6,9873
10.		6,9883	6,9883	6,9873	6,9879	6,9878
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		6,9885	6,9884	6,9875	6,9876	6,9876

Tablica 16. Prikaz izmjerenih vrijednosti osme stepenice stepeničastog etalona

Mjerenje broj	Nazivna dimenzija					
1.	8	7,9922	7,9922	7,9922	7,9925	7,9919
2.		7,9949	7,9923	7,9944	7,9922	7,9922
3.		7,9924	7,9922	7,9928	7,9923	7,9925
4.		7,9933	7,9924	7,9921	7,9922	7,9926
5.		7,9932	7,9923	7,9932	7,9925	7,9927
6.		7,9921	7,9926	7,9924	7,9924	7,9929
7.		7,9924	7,9922	7,9923	7,9922	7,9927
8.		7,9926	7,9923	7,9930	7,9924	7,9928
9.		7,9922	7,9924	7,9928	7,9926	7,9926
10.		7,9923	7,9919	7,9922	7,9925	7,9928
Aritmetička sredina, $\bar{x}$		7,9927	7,9923	7,9927	7,9924	7,9926

Tablica 17. Rezultati mjerenja na stepeničastom etalonu

Mjerena veličina, mm	Tolerancije mm	Mjerenje br.1 mm	Mjerenje br. 2 mm	Mjerenje br. 3 mm	Aritmetička sredina $\bar{x}$, mm
15 (širina)	±0,05	15,085	15,085	15,085	15,085
120	±0,05	120,088	120,087	120,088	120,088
15 (dužina)	±0,05	15,116	15,112	15,113	15,114

Sve mjerene veličine u odnosu na zadane nazivne veličine i pripadajuće tolerancije se nalaze unutar dopuštenih granica.

7. MJERNA NESIGURNOST [1]

Mjerna nesigurnost definirana je kao parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini uz određenu vjerojatnost .

Mjernu nesigurnost procjenjujemo iz razloga što mjerenja nisu savršena kako zbog djelovanja slučajnih utjecaja kao što su temperatura, tlak, vlaga, nesavršenost uređaja tako i zbog ograničenih mogućnosti korekcije sustavnih djelovanja (promjena karakteristike instrumenata između dva umjeravanja, nesigurnost vrijednosti referentnog etalona, itd). Bez pokazatelja nesigurnosti mjerni rezultati ne mogu se uspoređivati ni međusobno niti s referentnim vrijednostima. Proračun mjerne nesigurnosti temelji se na procjenama iz nepoznatih razdioba vjerojatnosti koje su određene pomoću ponovljenih mjerenja ili obnovljenih mjerenja.

Tri su načina procjene mjerne nesigurnosti :

1. GUM metoda (engl. Guide to Expression of Uncertainty in Measurement)
2. MCS metoda (engl. Monte Carlo Simulation)
3. Procjena ponovljivosti i obnovljivost rezultata mjerenja sukladno normi ISO 21748:2017

GUM metoda sastoji se od:

- Postavljanje mjernog (matematičkog) modela
- Određivanje standardnih nesigurnosti $u(xi)$
- Određivanje sastavljene standardne nesigurnosti u_c
- Određivanje proširene nesigurnosti U
- Prikaz mjernog rezultata

GUM metoda po koracima :

Prvi korak u GUM metodi jest postavljanje mjernog modela, odnosno matematičkog modela koji povezuje izlaznu veličinu s ulaznima. Model se postavlja zato jer se u većini slučajeva mjerna veličina ne mjeri izravno, nego se određuje iz drugih veličina x_1, x_2, ..., x_n na temelju funkcijskog odnosa ulaznih veličina i izlazne veličine.

$$X = f(X1, X2, \dots Xn) \quad (1)$$

Standardna nesigurnost određuje se na dva načina: iz tipa A i iz tipa B.

Standardna nesigurnost A vrste se zasniva na bilo kojoj prihvatljivoj metodi npr.: računanje standardnog odstupoanja srednje vrijednosti mjernog niza, zatim primjena metode najmanjih kvadrata odstupanja ili ANOVA (analiza varijance).Standardna nesigurnost B vrste: se temelji na znanstvenoj prosudbi raspoloživih podataka o mjernoj veličini npr.: iskustvo ili poznavanje ponašanja svojstava i instrumenata, podaci iz priručnika ili proizvođačevi tehnički podaci.

Sastavljena nesigurnost izračunava se sastavljanjem pojedinačnih sastavnica nesigurnosti u skladu sa zakonom prijenosa nesigurnosti, odnosno ona se određuje sastavljanjem standardnih nesigurnosti procjena ulaznih veličina. Sastavljena standardna nesigurnost različito se računa za nekorelirane i korelirane ulazne veličine.

Nekorelirane ulazne veličine: $$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\delta f}{\delta x_i}\right) u^2\,(x_i) \quad (2)$$

Korelirane ulazne veličine:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 \times u(x_i)^2 + 2 \times \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^{N} \frac{\partial f}{\partial x_i} \times \frac{\partial f}{\partial x_j} \times u(x_i, x_j)} \quad (3)$$

gdje su:

u_c - Sastavljena standardna nesigurnost
c_i - Koeficijent osjetljivosti

Proširena nesigurnost je veličina koja određuje interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini.

$$U = u_c \times k \quad (4)$$

Gdje je u_c sastavljena standardna nesigurnost, a k je faktor pokrivanja.

Prikaz mjernog rezultata se pokazuje u obliku:

$$X = x; U; k; P \tag{5}$$

7.1. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na CMM-u (trokordinatni mjerni uređaj)

Zbog činjenice da su različite značajke poput:

- odstupanja od paralelnosti,
- ravnosti i
- okomitosti,

koje je potrebno utvrditi za ultrazvučni etalon br. 1, ostvarene korištenjem CMM-a te da same procjene mjerne nesigurnosti *U* izmjerenih značajki korištenjem CMM predstavljaju kompleksan model za potrebe izrade ovog rada preuzete su iskustvene mjerne nesigurnosti u Laboratoriju za precizna mjerenja duljina pri Fakultetu strojarstva i brodogradnje temeljene na dugogodišnjem iskustvu u mjerenju tih značajki na trokoordinatnom mjernom uređaju (CMM-u).

7.2. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na 2D optičkom mjernom uređaju

Zbog činjenice da su mjerene različite mjerne veličine poput:

- duljinskih mjera (dužina, širina..)
- radijusa i
- promjera

ostvarene korištenjem alatnog mikroskopa. S obzirom na različite mjerene značajke, procjena mjerne nesigurnosti vrlo je kompleksna i ovisi o različitim čimbenicima poput izbora objektiva, odabira mjernih točaka, izvora svjetlosti i sl. stoga nije moguće postaviti zajednički model mjerne nesigurnosti za sve mjerene značajke. Temeljem dugogodišnjeg iskustva Laboratorija za precizna mjerenja dužina optičkim uređajima i s obzirom na graničnu pogrešku alatnog mikroskopa, mjerna nesigurnost *U* procijenjena je iskustveno na kritičnoj dimenziji – mjerenje radijusa, te se smatra da će mjerna nesigurnost ostalih značajki biti manja ili jednaka.

7.3. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na mikrometru

Korištenjem mikrometra za vanjska mjerenja provedeno je mjerenje dviju veličina - debljine etalona br.1 i br.2. S obzirom na utvrđeno rasipanje rezultata mjerenja te iskustvo pri korištenju tog ručnog mjerila od strane mjeritelja u Laboratorija za precizna mjerenja dužina procijenjena je proširena mjerna nesigurnost u iznosu od U = 15 μm, k =2, P = 95 %.

7.4. Procjena mjerne nesigurnosti mjerenih veličina na uređaju za ispitivanje hrapavosti

Korištenjem elektroničko-mehaničkog uređaja s ticalom provedeno je mjerenje parametra hrapavosti *Ra* na etalonima br. 1, br. 2. S obzirom na nazivne vrijednosti parametra *Ra* te iskustva u mjerenju tog parametra na realnim tehničkim površinama u Laboratorija za precizna mjerenja dužina procijenjena je proširena mjerna nesigurnost u iznosu od U = 0,1 μm, k =2, P = 95 %.

7.5. Procjena mjerne nesigurnosti mjerene veličine ostvarene na jednoosnom mjernom uređaju

Za mjerenje mjerene veličine - debljine na stepeničastom etalonu korišten je jednoosni mjerni uređaj (ULM).

Matematički model

Za procjenu mjerne nesigurnosti potrebno je kao prvi korak postaviti matematički model koji mora sadržavati sve sastavnice koje utječu na rezultate mjerenja. Nakon proučavanja utjecaja na rezultate mjerenja izvedena je jednadžba modela (6). Iz jednadžbe (6) član (δd_F) se zanemaruje jer svojim iznosom neznatno utječe na rezultat.

$$d = d_V + \delta d_I + \delta d_T + \delta d_F \tag{6}$$

Gdje je:

d – debljina etalona

d_V – izmjerena debljina etalona

δd_I – utjecaj mjernog instrumenta

δd_T – utjecaj razlike temperature

δd_F – mehanički utjecaji

Jednadžba (6) se može također izraziti tako da se član δd_T raspiše te se dobije jednadžba (7).

$$d = d_V + \delta d_I + d_e \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t + \delta d_F \tag{7}$$

Gdje je:

Δt – razlika temperatura etalona i skale mjernog uređaja

$\bar{\alpha}$ – prosječni koeficijent temperaturnog širenja etalona i skale mjernog uređaja

d_e – nazivna debljina etalona

Nesigurnost očitanja debljine etalona, $u(\delta d_V)$

Procijenjeno standardno odstupanje je mjera koja govori koliko su vrijednosti raspršene od aritmetičke sredine. Jednadžbe po kojima se određuje dane su u nastavku.

$$s_i^2 = \frac{\sum_{k=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n-1} \tag{8}$$

Zbirno procijenjeno standardno odstupanje se određuje prema jednadžbi (9).

$$s_p = \sqrt{\frac{s_1^2 + \cdots + s_n^2}{n}} \tag{9}$$

Utvrđivanje utjecaja ponovljivosti rezultata mjerenja provedeno je na ostvarenim rezultatima mjerenja iz tablice 15 temeljem izraza (8) i (9), uz pretpostavku da će se ubuduće provoditi tri ponovljena mjerenja:

$$u(d_V) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{8{,}7}{\sqrt{3}} = 5 \text{ µm} \tag{10}$$

Nesigurnost zbog utjecaja mjernog instrumenta, $\boldsymbol{u(\delta d_I)}$

Utjecaj mjernog instrumenta u(δd_I) proizlazi iz dokumentacije instrumenta od proizvođača.

$$u(\delta d_I) = (0{,}175 + 0{,}5d^2) \text{ µm}, \ \ d \text{ u m} \tag{11}$$

Nesigurnost zbog utjecaja temperature, $\boldsymbol{u(\Delta t)}$

Prije umjeravanja treba paziti da se osigura temperaturna stabilizacija etalona s obzirom na temperaturu u mjeriteljskom prostoru. Pretpostavlja se da su nakon adekvatnog vremena etalon i uređaj na istoj temperaturi, ali bi razlika temperature mogla biti, s istom vjerojatnošću, bilo gdje u procijenjeno intervalu ± 0,5 °C.

$$u(\Delta t) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0{,}5}{\sqrt{3}} = 0{,}289°C \qquad \text{µm} \tag{12}$$

Nesigurnost zbog mehaničkih utjecaja, $\boldsymbol{u(\delta d_F)}$

Nesigurnost mehaničkih utjecaja podrazumijeva utjecaj deformacije etalona uslijed mjerne sile te suosnost mjernih kapica. Ukupna varijabilnost procjenjuje se intervalom ± 2,0 µm.

$$u(\delta d_F) = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} = 1{,}15 \qquad \text{µm} \tag{13}$$

Sastavljena mjerna nesigurnost, $\boldsymbol{u_c}$

$$u_c = \sqrt{u(d_V)^2 \times c_V^2 + u(\delta d_I)^2 \times c_{\delta d_I}^2 + u(\Delta t)^2 \times c_{\Delta t}^2 + u(\delta d_F)^2 \times c_{\delta d_F}^2} \tag{14}$$

Množenjem sastavljene standardne mjerne nesigurnosti s faktorom pokrivanja k dobiva se proširena mjerna nesigurnost:

$$U = k \times u_c \text{ , µm } k = 2; P = 95\ \%$$

Svi utjecaji na mjernu nesigurnosti kao i njihovi iznosi prikazani su u tablici 17.

Tablica 18. Sastavnice standardne mjerne nesigurnosti

Sastavnica standardne mjerne nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Iznos standardne nesigurnosti, µm	Koeficijent osjetljivosti, *ci*	Razdioba	Doprinos mjernoj nesigurnosti, µm, *d* u m
$u(d_V)$	Ponovljivost	5,0	1	Normalna	5,0
$u(\delta d_I)$	Utjecaj instrumenta	$0{,}175 + 0{,}5 \cdot d^2$ *d* u m	1	Normalna	$0{,}175 + 0{,}5 \cdot d^2$
$u(\delta d_T)$	Utjecaj temperature	0,289 °C	$11{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot d$	Pravokutna	$3{,}323 \cdot d$
$u(\delta d_K)$	Mehanički utjecaji	1,15	1	Pravokutna	1,15
Sastavljena standardna mjerna nesigurnost u_c				u_c =5,1 µm	
Proširena mjerna nesigurnost *U* za *k* = 2; *P* =95%				***U* = 10 µm**	

8. ZAKLJUČAK

Umjeravanja mjernih uređaja i etalona bitno je provoditi redovito kako bi osigurali pouzdane i sljedive rezultate mjerenja. Etaloni za ultrazvučno ispitivanje dolaze u mnogim oblicima i veličinama. Izbor etalona ovisi o samom predmetu koji će biti podvrgnut ultrazvučnom ispitivanju. Materijal ultrazvučnog etalona trebao bi biti isti kao i materijal koji se ispituje. Kako bi se osiguralo pouzdano ispitivanje ultrazvukom potrebno je, prilikom postupka podešavanja parametara ispitnog uređaja, koristiti etalon s pouzdanim i sljedivim mjernim značajkama. Odnosno, potrebno je provesti umjeravanje etalona za ultrazvuk. U ovome radu su se usporedili zahtjevi za etalone br. 1, br. 2 i stepeničastog etalona triju relevantnih normi:

- ISO 2400-2012: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom -Specifikacija za radni etalon br. 1
- ISO 7963-2010: Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija radnog etalona br. 2 i
- ISO/DIS 16946:2012: nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - specifikacija za stepeničasti etalon.

U normama se prikazuju i sistematiziraju tehnički zahtjevi u pogledu postava mjernih parametara za određivanje brzine ultrazvuka, no u okviru ovog rada naglasak je na mjerenja kritičnih dimenzija etalona. Prema savjetima prof. dr. sc. Damira Markučiča, a uvažavajući njegovo dugogodišnje iskustvo u području ultrazvučnog ispitivanja utvrđene su kritične dimenzije koje je potrebno izmjeriti na radnim etalonima br. 1, br. 2 te stepeničastom etalonu. Mjerenja su provedena na mjernim uređajima prema kojima su se mogle izmjeriti kritične dimenzije u odnosu na zahtjeve tolerancija prema relevantnim tehničkim normama.

Za radni etalon br. 1 su se koristili CMM (trokoordinatni mjerni uređaj) koji je služio za određivanje značajki kao što su odstupanja od paralelnosti, ravnosti i okomitosti, zatim mikrometar koji je služio za mjerenje debljine i optički 2D uređaj za ostalih kritične dimenzije.

Za radni etalon br. 2 korišten je mikrometar za mjerenje debljine etalona te optički 2D mjerni uređaj za mjerenje ostalih kritičnih dimenzija.

Za stepeničasti radni etalon koristio se ULM (jednoosni mjerni uređaj) zbog zahtjeva na toleranciju debljina stepenica stepeničastog etalona prema releventnoj normi ISO/DIS

16946:2012: nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - specifikacija za stepeničasti etalon.

Na temelju dobivenih rezultata za etalon br. 1 može se zaključiti da su mjerne veličine koje se nalaze izvan zadanih granica tolerancije veličine 35 mm, *R* 100 mm i *Φ* 50 mm, te vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* na površinama 300 mm x 100 mm (D) i 300 mm x 100 mm (L). Dobiveni rezultati za etalon br. 2 na prikazuju da su mjerne veličine koje se nalaze izvan zadanih granica tolerancije veličine 50 mm i *R* 25 mm, te vrijednosti parametra hrapavosti *Ra* površina uz *R* 25 mm i *R* 50 mm. Dok se na temelju dobivenih rezultata za stepeničasti etalon može zaključiti da su sve mjerene veličine unutar zadanih granica tolerancije.

Kako je prikazano u radu, veliki broj mjernih veličina potrebno je periodički mjeriti na radnim etalonima br. 1 i br. 2 kako bi se osigurala njihova pouzdanost u primjeni. S obzirom da su neke mjerne veličine ostvarene na površinama koje se zbog same uporabe etalona brže i u većoj mjeri oštećuju, posljedično se i rezultati mjerenja tih veličina kroz vrijeme značajne mijenjaju. Stoga bi bilo korisno utvrditi i različite periode umjeravanja za različite mjerne značajke na radnim etalonima br. 1 i br. 2, a temeljem praćenja rezultata njihovim izmjera kroz razuman vremenski period.

LITERATURA

[1] Predavanja iz kolegija teorija i tehnika mjerenja, FSB Zagreb 2014, Biserka Runje

[2] https://hr.wikipedia.org/wiki/Ultrazvu%C4%8Dna_kontrola (05.12.2017)

[3] https://www.ndeed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/CalibrationMeth/calibrationmethods.htm (07.12.2017)

[4] PH tool reference standards-katalog 2013god.

[5] ISO 2400:2012- Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom -Specifikacija za radni etalon br. 1

[6] ISO 7963:2010- Nerazorno ispitivanje - Ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija radnog etalona br. 2

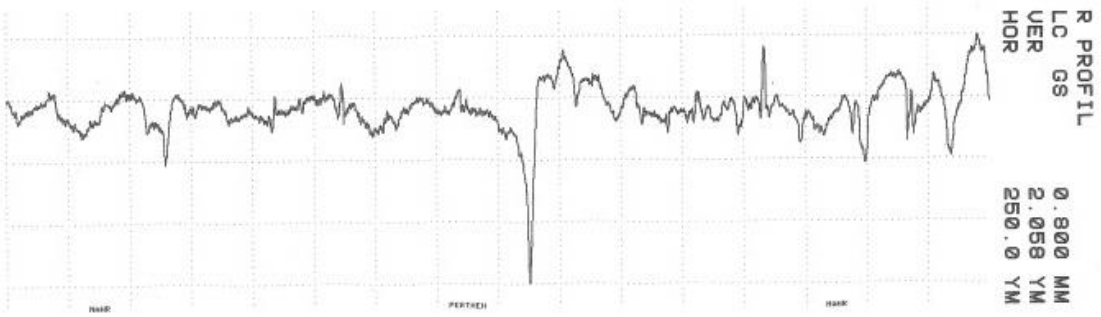
[7] ISO/DIS 16946:2012: Nerazorno ispitivanje - ispitivanje ultrazvukom - Specifikacija za stepeničasti etalon

PRILOG 1

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:300X25 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

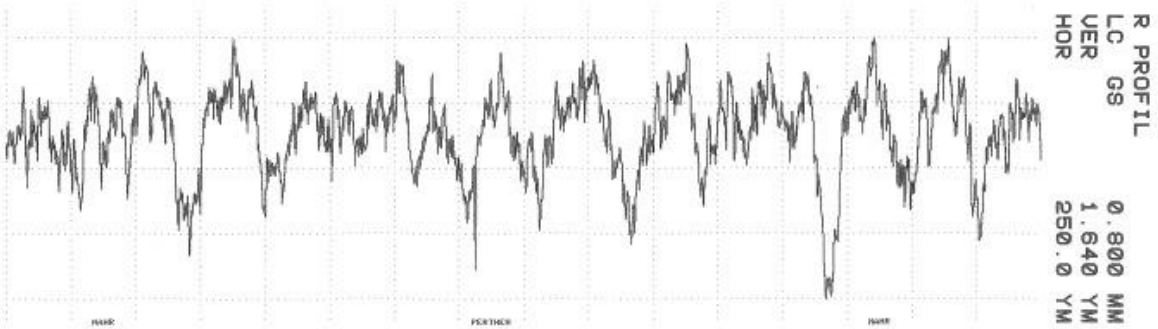
	KENNWERT		STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	7.60	5.17	13.05	16.41	3.36		
2	RZ	YM	4.78	2.42	6.12	9.03	2.91		
3	RA	YM	0.64	0.26	0.64	1.08	0.43		
4	RP	YM	2.17	0.60	1.59	2.96	1.37		
5	RPM	YM	1.54	0.27	0.73	1.85	1.12		
6	WT	YM	4.30	1.74	4.34	6.18	1.84		
7	RT	YM	8.06	5.50	14.01	17.40	3.40		
8	PT	YM	9.65	5.52	14.74	18.87	4.13		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:R100 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

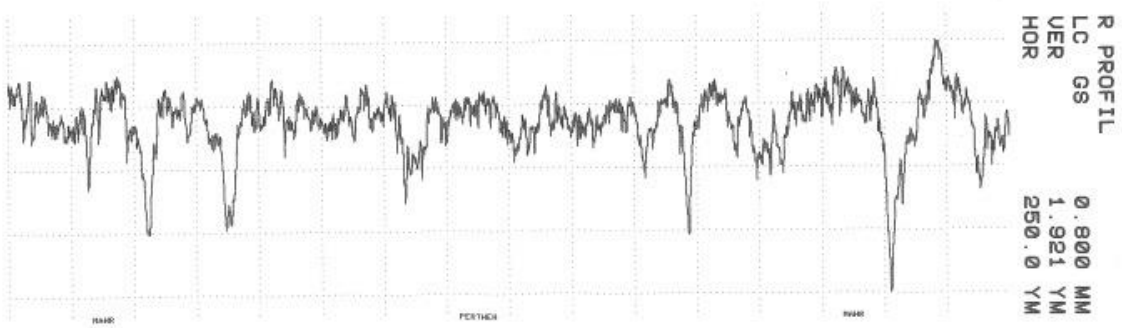
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	5.78	0.71	1.59	6.67	5.07		
2	RZ	YM	4.44	0.50	1.20	5.32	4.12		
3	RA	YM	0.65	0.11	0.30	0.81	0.51		
4	RP	YM	2.36	0.49	1.28	3.17	1.88		
5	RPM	YM	1.87	0.24	0.63	2.17	1.55		
6	WT	YM	2.09	0.54	1.34	2.62	1.29		
7	RT	YM	5.91	0.73	1.71	6.78	5.07		
8	PT	YM	6.94	0.87	2.06	7.79	5.73		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:100X25 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

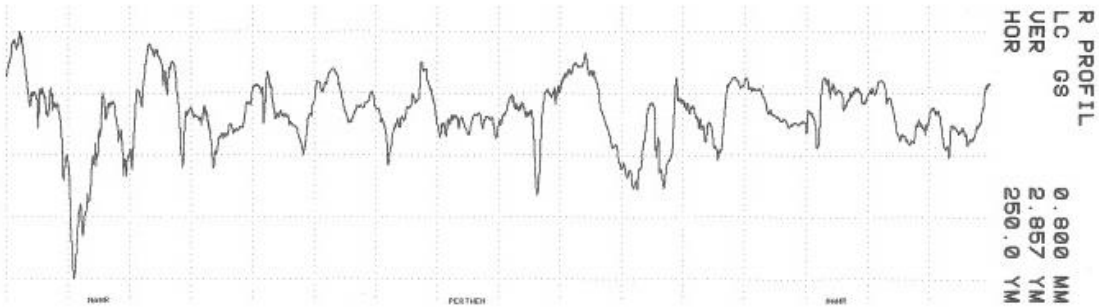
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	7.68	3.44	9.13	13.11	3.97		
2	RZ	YM	4.68	1.40	3.43	6.91	3.49		
3	RA	YM	0.60	0.09	0.21	0.70	0.50		
4	RP	YM	2.03	0.50	1.11	2.62	1.52		
5	RPM	YM	1.47	0.17	0.38	1.63	1.24		
6	WT	YM	2.94	0.95	2.28	4.25	1.97		
7	RT	YM	7.77	3.33	8.77	13.11	4.33		
8	PT	YM	8.87	3.21	8.71	13.89	5.17		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:300X100 D NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

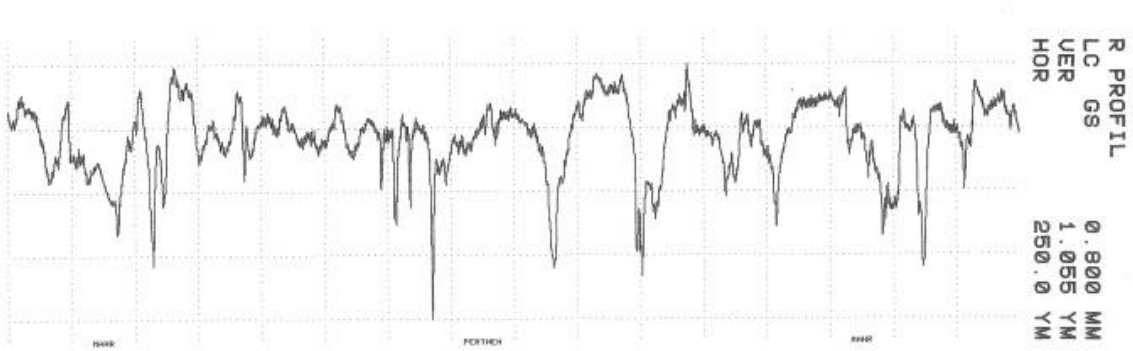
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	9.70	2.62	6.48	12.66	6.18		
2	RZ	YM	6.89	1.38	3.57	9.20	5.63		
3	RA	YM	1.12	0.20	0.53	1.40	0.88		
4	RP	YM	3.52	0.70	1.69	4.33	2.63		
5	RPM	YM	2.36	0.32	0.79	2.72	1.93		
6	WT	YM	5.54	1.94	4.87	8.83	3.97		
7	RT	YM	10.48	2.45	5.51	12.66	7.15		
8	PT	YM	13.69	2.68	5.56	16.19	10.63		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:200X25 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

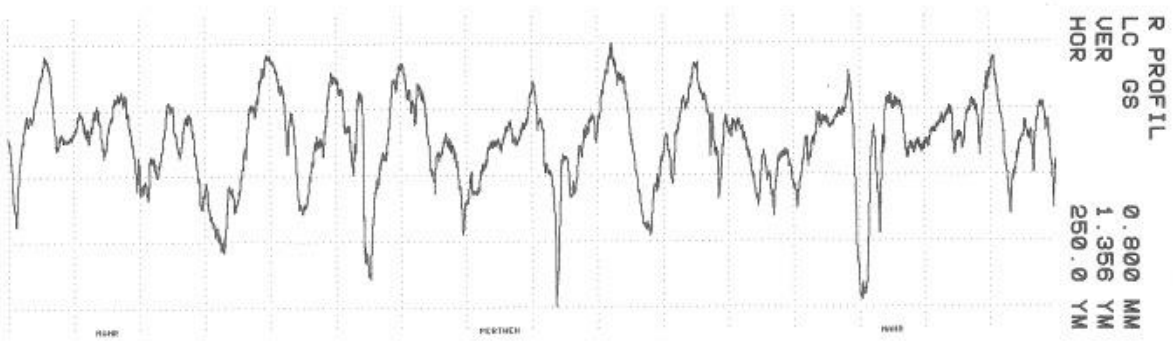
	KENNWERT		STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	5.06	1.36	3.20	7.23	4.04		
2	RZ	YM	3.73	0.48	1.13	4.36	3.23		
3	RA	YM	0.45	0.02	0.05	0.47	0.43		
4	RP	YM	1.74	0.61	1.57	2.79	1.22		
5	RPM	YM	1.23	0.21	0.55	1.59	1.04		
6	WT	YM	2.80	0.74	1.90	3.88	1.98		
7	RT	YM	5.14	1.31	3.20	7.23	4.04		
8	PT	YM	6.59	1.36	3.40	8.81	5.42		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:300X100 L NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

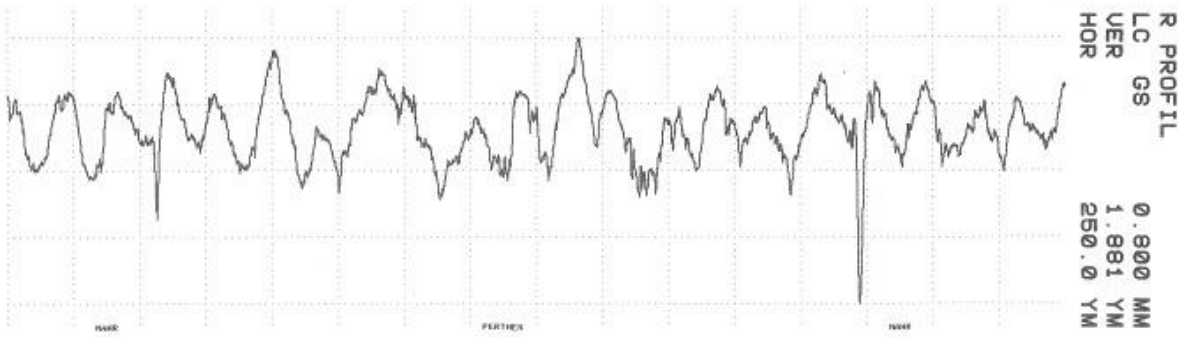
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	12.42	4.97	12.70	18.13	5.42		
2	RZ	YM	7.48	2.37	5.84	10.32	4.48		
3	RA	YM	1.12	0.30	0.79	1.49	0.70		
4	RP	YM	3.45	1.29	3.27	5.33	2.05		
5	RPM	YM	2.38	0.40	1.04	2.86	1.82		
6	WT	YM	8.17	4.38	11.58	14.50	2.92		
7	RT	YM	12.58	5.06	12.70	18.13	5.42		
8	PT	YM	17.07	6.48	16.81	24.03	7.23		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V1 NR.:40X25 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	6.53	1.59	4.16	8.93	4.78		
2	RZ	YM	4.48	0.30	0.77	4.95	4.18		
3	RA	YM	0.76	0.05	0.12	0.82	0.70		
4	RP	YM	2.37	0.16	0.37	2.59	2.23		
5	RPM	YM	1.88	0.14	0.34	2.02	1.69		
6	WT	YM	3.04	0.94	2.43	4.52	2.08		
7	RT	YM	6.81	1.60	4.08	8.93	4.85		
8	PT	YM	8.63	2.16	5.90	12.08	6.18		

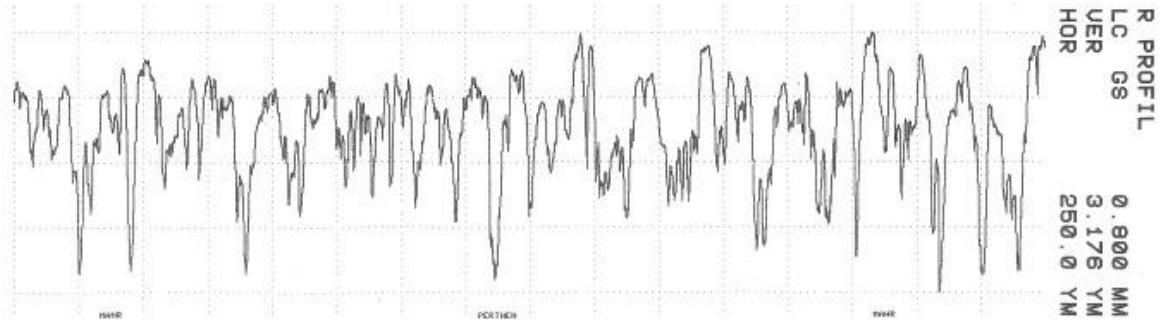


PRILOG 2

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V2 NR.:43.3X12.5 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

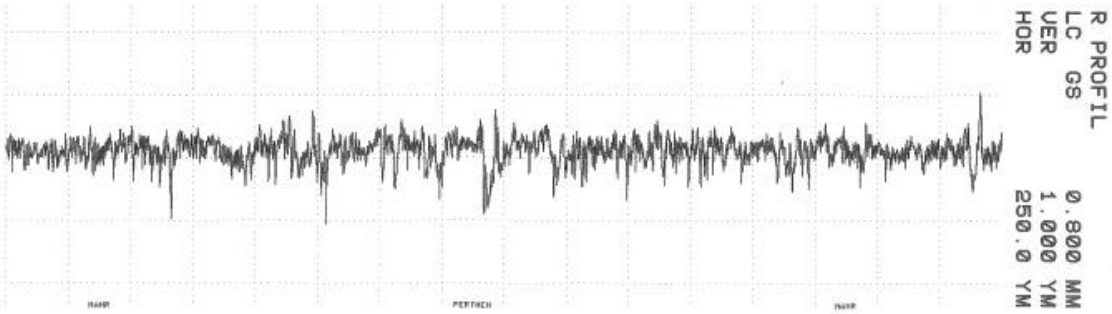
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	13.83	2.83	7.41	17.70	10.29		
2	RZ	YM	10.98	1.56	4.20	13.35	9.15		
3	RA	YM	1.75	0.22	0.58	2.00	1.42		
4	RP	YM	4.73	0.74	1.75	5.78	4.02		
5	RPM	YM	4.09	0.64	1.54	5.11	3.57		
6	WT	YM	5.43	3.64	9.25	11.41	2.15		
7	RT	YM	14.05	2.93	7.23	17.70	10.47		
8	PT	YM	17.20	4.08	10.19	21.65	11.46		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V2 NR.:L NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

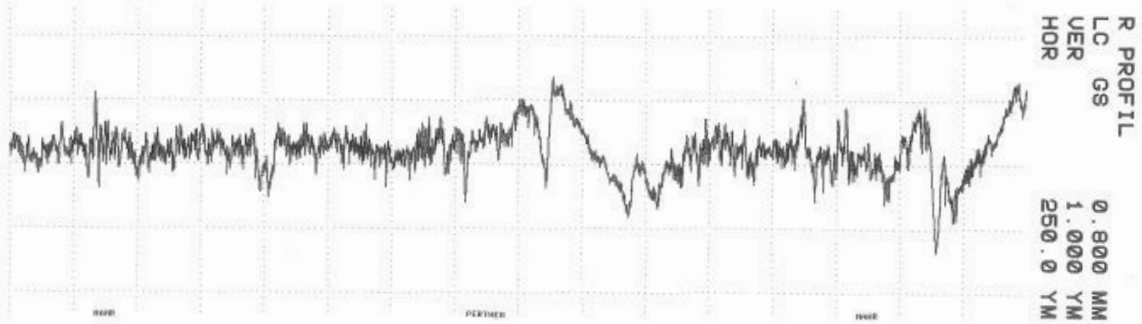
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	2.01	0.54	1.37	2.87	1.50		
2	RZ	YM	1.46	0.23	0.58	1.72	1.14		
3	RA	YM	0.14	0.02	0.05	0.17	0.11		
4	RP	YM	0.62	0.21	0.52	0.95	0.43		
5	RPM	YM	0.48	0.11	0.25	0.63	0.37		
6	WT	YM	0.30	0.10	0.24	0.42	0.18		
7	RT	YM	2.15	0.54	1.38	2.93	1.55		
8	PT	YM	2.22	0.61	1.58	3.10	1.52		



perthometer 58P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V2 NR.:0 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

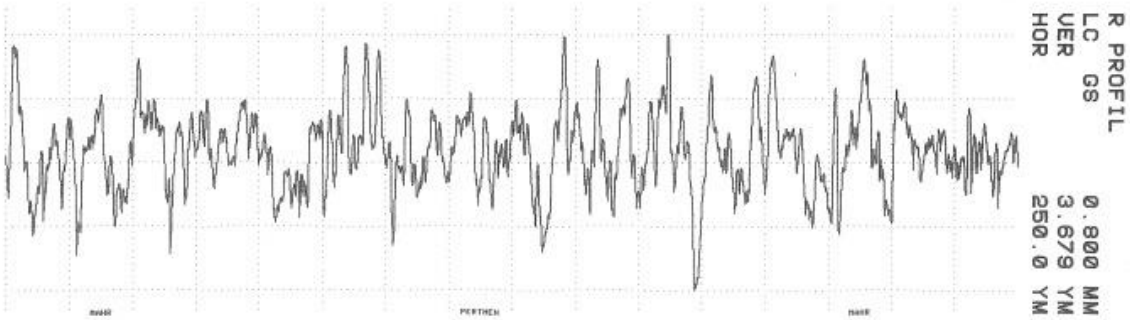
KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	3.90	3.99	9.28	10.99	1.70		
2	RZ	YM	2.01	1.05	2.60	3.86	1.26		
3	RA	YM	0.24	0.12	0.30	0.43	0.14		
4	RP	YM	1.34	0.80	1.85	2.76	0.91		
5	RPM	YM	0.82	0.31	0.77	1.34	0.56		
6	WT	YM	2.44	2.75	6.77	6.97	0.19		
7	RT	YM	3.99	3.93	9.25	10.99	1.74		
8	PT	YM	5.64	4.18	9.32	11.26	1.94		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V2 NR.:R25 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	13.78	1.22	2.67	15.11	12.44		
2	RZ	YM	11.62	1.07	2.35	12.60	10.25		
3	RA	YM	1.70	0.09	0.22	1.78	1.56		
4	RP	YM	7.04	1.22	3.14	9.11	5.97		
5	RPM	YM	5.56	0.54	1.28	6.13	4.84		
6	WT	YM	5.84	2.03	4.91	8.04	3.14		
7	RT	YM	14.70	2.32	5.56	18.01	12.44		
8	PT	YM	18.26	3.07	6.76	21.63	14.87		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen

LT	5.600 MM
LM	4.000 MM
VB	125.0 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

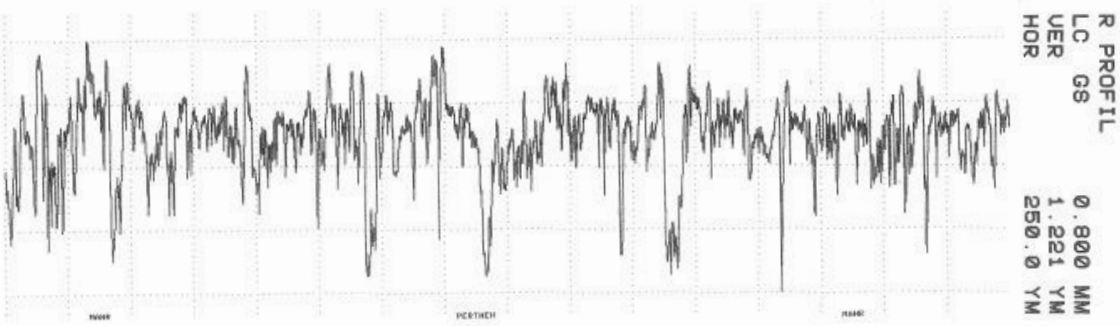
FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:V2

NR.:75X12.5
NAME:

MESS.-NR.: 5
T8 FRW-750 750 26

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS	0.800 MM	X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	5.28	1.14	2.79	7.23	4.43		
2	RZ	YM	4.37	0.73	1.90	5.51	3.61		
3	RA	YM	0.59	0.15	0.37	0.80	0.43		
4	RP	YM	1.88	0.33	0.88	2.35	1.47		
5	RPM	YM	1.59	0.26	0.54	1.88	1.34		
6	WT	YM	1.11	0.41	1.00	1.75	0.76		
7	RT	YM	5.53	1.11	2.72	7.23	4.51		
8	PT	YM	6.09	1.65	4.22	8.77	4.55		



perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 125.0 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:V2 NR.:R50 NAME: MESS.-NR.: 5 T8 FRW-750 750 26

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	14.77	1.93	4.81	18.14	13.33		
2	RZ	YM	11.23	1.38	3.85	13.31	9.46		
3	RA	YM	1.74	0.20	0.51	1.94	1.43		
4	RP	YM	6.90	1.12	2.99	8.19	5.20		
5	RPM	YM	4.90	0.26	0.63	5.17	4.54		
6	WT	YM	4.60	1.41	3.68	6.44	2.76		
7	RT	YM	14.89	1.96	4.92	18.25	13.33		
8	PT	YM	16.24	2.69	7.05	20.32	13.27